

# Simulation der motorischen Gemischbildung und Verbrennung Möglichkeiten und Grenzen

Merker, Günter Peter

Veröffentlicht in:  
Jahrbuch 2003 der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.71-74



J. Cramer Verlag, Braunschweig

GÜNTER P. MERKER, Hannover

## Simulation der motorischen Gemischbildung und Verbrennung Möglichkeiten und Grenzen

Hannover, 07.11.2003\*

### 1. Einleitung

Infolge der zunehmenden Komplexität und der drastisch reduzierten Entwicklungszeiten von Verbrennungsmotoren als Antriebsaggregat für Fahrzeuge aller Art hat die Simulation der im Brennraum des Motors ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die vom Gesetzgeber sukzessive reduzierten Grenzwerte für die limitierten Schadstoffkomponenten Kohlenmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) und Ruß können nur durch ein vertieftes Verständnis der im Brennraum ablaufenden Prozesse erreicht werden.

### 2. Modellkategorien

Die für die Simulation verwendeten Rechenmodelle lassen sich prinzipiell in drei Kategorien einteilen, nämlich in thermodynamische, phänomenologische und 3D-CFD (computational fluid dynamics) Modelle, wobei der Rechenaufwand mit der Modelltiefe drastisch ansteigt, siehe Bild 1.

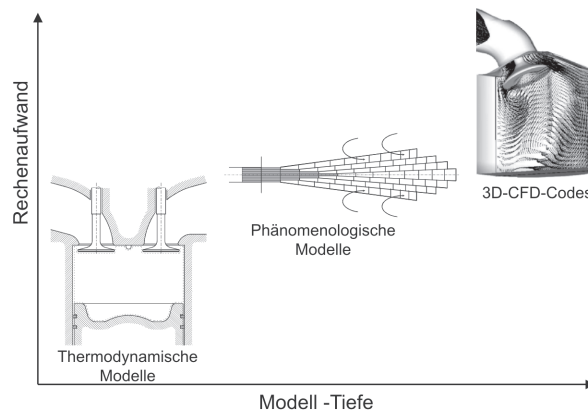


Bild 1: Modell-Kategorien

\* Kurzfassung eines Vortrags gehalten in der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

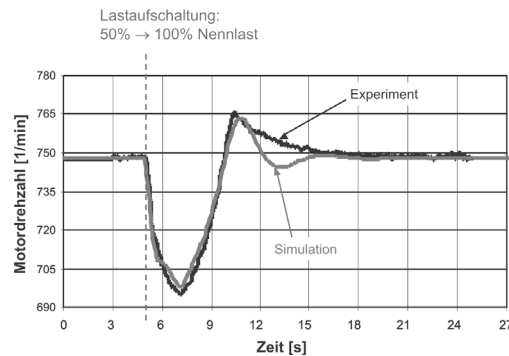


Bild 2: Thermodynamische Modelle: Laistaufschaltung bei einem Stationärmotor

Thermodynamische Modelle betrachten den Brennraum als „ideal gerührten Behälter“ und berechnen den Druck und die kalorische Mitteltemperatur als Funktion der Zeit mittels Massen- und Energiebilanz (1. Hauptsatz der Thermodynamik) sowie der Zustandsgleichung für das ideale Gas. Sie werden im Rahmen der Gesamtprozessanalyse zur Simulation von Fahrzyklen eingesetzt. Wegen ihrer geringen Modelltiefe benötigen sie relativ viele an den jeweiligen Motor anzupassende Parameter. Sie erfordern jedoch relativ wenig Rechenzeit, so dass eine Echtheitssimulation grundsätzlich möglich ist. Als Beispiel zeigt Bild 2 den Vergleich zwischen Simulation und Experiment für die Laistaufschaltung eines Aggregatormotors von 50% auf 100 % Nennlast.

Phänomenologische Mehrzonenmodelle unterteilen den Brennraum in viele kleine Zellen (ebenfalls ideal gerührte Behälter) und betrachten die Gemischbildung innerhalb dieser Zellen, sowie den Massen- und Energietransport zwischen ihnen. Auch bei diesen Modellen wird das Strömungsfeld nicht explizit berechnet, sondern mittels geeigneter Kenngrößen näherungsweise erfasst. Die bei der Gemischbildung, Zündung, Verbrennung und Schadstoffbildung ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse werden dabei mit Hilfe von halbempirischen Modellen erfasst. Damit können dann die Wärmefreisetzung durch die Verbrennung, die thermische Stickoxidbildung und näherungsweise auch die Rußbildung berechnet werden, siehe Bild 3.

Im Rahmen der 3D-CFD-Modellierung werden die zeit- und ortsabhängigen Transportgleichungen für Masse, Energie und Impuls (Navier-Stokes-Gleichungen) numerisch gelöst. Üblicherweise werden dabei Berechnungsgitter mit etwa  $10^6$  Knotenpunkten verwendet. Um auch die kleinsten Wirbelstrukturen aufzulösen, wären  $10^{12}$  und mehr Gitterpunkte erforderlich. Weil dies jedoch die Speicherkapazität und die Datenverarbeitungsgeschwindigkeit selbst der heute verfügbaren größten Rechenanlage um Zehnerpotenzen übersteigt, werden die kleinsten Wirbelstrukturen mit Turbulenzmodellen (das  $k,\epsilon$ -Modell ist dabei sehr verbreitet) beschrieben. Als Beispiel zeigt Bild 4 einen Vergleich zwischen Messung und Simulation für die Düseninnenströmung und den primären Strahlzerfall.

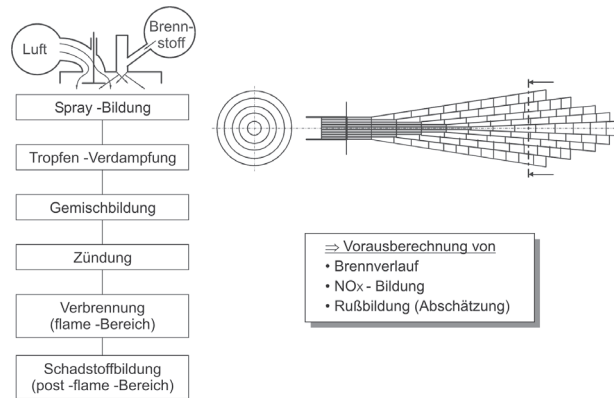


Bild 3: Phänomenologische Mehrzonenmodelle

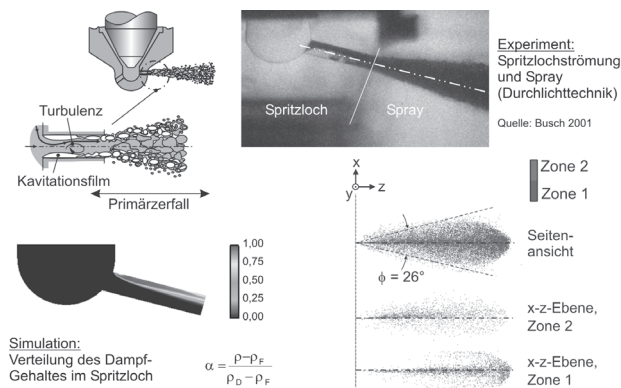


Bild 4: Vergleich zwischen Messung und Simulation für die Düseninnenströmung und den primären Strahlerfall

### 3. Möglichkeiten und Grenzen

Die nulldimensionalen thermodynamischen Modelle werden in der Motoren- und Fahrzeugentwicklung für Parameterstudien und für Gesamtprozessanalysen eingesetzt. Mit den quasidimensionalen, phänomenologischen Mehrzonenmodellen kann die Gemischbildung in Brennräumen und die Wärmefreisetzung bei der Verbrennung berechnet werden. Durch Einbindung von reaktionskinetischen Algorithmen können zusätzlich der zeit-

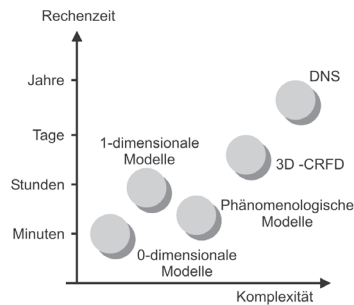


Bild 5: Grenzen der Verbrennungssimulation

liche Verlauf der Stickoxidkonzentration hinreichend genau und der der Rußkonzentration qualitativ richtig simuliert werden. Mit den dreidimensionalen CFD-Codes kann darüber hinaus das instationäre Strömungsfeld in Brennräumen berechnet werden. Die Simulation der bei der Gemischbildung, Zündung, Verbrennung und Schadstoffbildung ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse steht dagegen noch am Anfang. Zum einen sind die zeit- und geometrieabhängigen Prozesse sehr komplex und im Detail oft nicht hinreichend gut verstanden und zum anderen sind die erforderlichen Rechenzeiten gewaltig, siehe Bild 5. Ein nicht zu unterschätzendes Problem stellt zudem die Netzabhängigkeit der numerischen Lösung und die Turbulenzmodellierung dar. Die chemischen Abläufe bei der Rußbildung und Rußoxidation sind sehr komplex und im Detail auch nicht bekannt. Die Modellierung und Simulation der Rußenstehung stellt deshalb eine große Herausforderung dar. Die numerische Simulation wird zunehmend an Bedeutung gewinnen. Für die realitätsnahe Modellierung der Detailprozesse und die Simulation der Gesamtprozesse besteht jedoch noch ein erheblicher Forschungsbedarf.